DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160944

冀宏杰, 张怀志, 张维理, 田昌玉. 我国农田土壤钾平衡研究进展与展望[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 920−930
Ji H J, Zhang H Z, Zhang W L, Tian C Y. Farmland potassium balance in China: A review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 920−930

我国农田土壤钾平衡研究进展与展望*

冀宏杰, 张怀志, 张维理, 田昌玉

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与养分循环重点开放实验室 北京 100081)

摘　要: 土壤钾平衡法是一种简便易行的判断土壤钾库丰缺状况的方法, 广泛应用于农田土壤钾素养分供应状况评价及科学施肥实践。本文从农田养分平衡的角度出发, 通过分析钾平衡的计算方法、农田钾平衡的时空变异特征、不同作物农田钾平衡状况、钾平衡对土壤钾含量的影响 4 个方面, 综述了近年来我国农田钾平衡研究的主要进展。研究表明, 我国农田钾平衡总体表现为亏缺, 时间维度上表现为自建国以来整体呈现先下降后上升趋势; 但不同区域间表现不一且变异较大, 部分区域的农田钾平衡状况表现为盈余; 不同区域及不同作物间钾平衡呈现"两极化"发展趋势; 作物之间的养分吸收特性不同以及肥料和农产品市场价格波动, 这两个因素共同决定了不同作物类型之间及同种作物不同年际间钾平衡的差异; 不同研究者对于我国农田钾平衡的总盈余量、单位面积盈余量以及空间变异特征所得结果差异较大, 宜对所选指标体系综合分析后比较, 而不宜进行直接对比; 而对时间变异、不同作物种植类型农田钾平衡以及土壤钾累积规律等方面的研究结果基本一致; 本质上来说, 当前土壤养分库状况是一个区域的种植制度、施肥方式经过多年的累积所造成的结果, 同时也决定着其未来的发展走向。为保持土壤钾养分库的稳定与提升, 基于我国钾平衡研究现状, 提出我国未来在养分均衡、开源节流、重视不同轮作情况下钾素的周年运筹以及关注更深层次的土壤分层钾养分库等几个改善农田钾平衡技术措施方面的研究方向。

关键词: 农田; 钾平衡; 钾亏缺; 钾"两极化"; 土壤钾库
中图分类号: S153.6　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2017)06-0920-11

Farmland potassium balance in China: A review*

JI Hongjie, ZHANG Huaizhi, ZHANG Weili, TIAN Changyu

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Plant Nutrient and Nutrient Cycle, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: Soil potassium balance (KB) is an indicator for potassium input and output in croplands. It is also a simple method to judge the situation of soil potassium deficiency, which has been extensively used in soil nutrient condition evaluation and fertilizer recommendations for crops. In this paper, KB in croplands in China was reviewed on four fronts — calculation method, spatio-temporal variability analysis, crop type difference analysis and soil potassium content analysis. The studies showed an overall deficient KB in croplands in China. Regional variations in potassium deficiency were significant, with surplus farmland potassium in some areas that resulted in KB polarization. The difference in nutrient uptake among crops, the fertilizer volatility and agricultural market prices together determine the difference in KB among different crop types or even same crop in different years. Due to differences in the calculation parameters or regional planning, vast differences were noted

* 公益性行业(农业)科研专项(201503121-13)资助
冀宏杰, 主要从事土壤与环境、植物营养与肥料方面的研究。E-mail: jihongjie@caas.cn
收稿日期: 2016-10-25 接受日期: 2017-02-24

* The study was supported by Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503121-13).
Corresponding author, JI Hongjie, E-mail: jihongjie@caas.cn
Received Oct. 25, 2016; accepted Feb. 24, 2017

in different reports (literatures) in terms of the amounts of total deficient potassium, deficient potassium per hectare and spatial variation in potassium deficiency. Thus although direct comparison of these results for different studies was apparently inappropriate, such comparison should be done after comprehensive analysis of related index systems. Irrespectively, in temporal variations, the effects of different planting on KB in croplands and soil potassium accumulation were basically identical. In essence, the current state of soil nutrient pool was the result of long-term accumulation of regional cropping systems (including rotation) and fertilization behaviors, which in turn determined future trend in the development of soil nutrient pool. In order to control soil potassium polarization and to ensure a stable promotion of soil potassium pool in China, it was recommended to focus future research on areas such as the optimization of nitrogen and potassium application amounts, KB in annual crop rotation systems, seasonal differentiation of potassium fertilization in accordance with soil application and crop adsorption characteristics.

Keywords: Cropland; Potassium balance; Potassium deficiency; Potassium polarization; Soil potassium pool

钾素是植物必须的 3 种大量营养元素之一，目前我国已成为全球钾肥需求最大的国家，而钾肥资源却相对贫乏，国产钾肥仅满足一半的需求。而土壤钾库或者钾供应强度很大程度上决定了钾肥投入的效率，因地、因时、因作物而异的科学施用钾肥，是提高作物产量和品质、合理使用宝贵的钾肥资源的基础。

表观养分平衡法通过计算农田土壤养分投入与产出之差，得到农田土壤养分元素的盈亏量，是一种简便易行的判断土壤养分库状况的方法，已广泛应用于大田粮油作物以及蔬菜、果树等经济作物的土壤养分供应状况评价及科学施肥[1-6]；同时，一个国家或地区农田养分平衡的基本状况，又决定了农田养分水平的发展趋向这样一个重大的问题[7]。那么，作为自 20 世纪 70 年代即开始从南到北日益显现肥效的钾肥，我国当前的钾素平衡状况如何，全国性、区域性、各作物的情况、钾素平衡对土壤钾养分库的影响如何？本文从与农业最直接相关的农田视角出发，从农田钾平衡的计算方法与钾素盈亏状况两个方面，综述了近年来我国不同尺度农田钾平衡的时空变异特征，以及不同类型作物种植的农田钾平衡状况，并就改善我国农田土壤钾平衡，提高耕地质量的技术方法进行探讨。

1　农田钾平衡的计算

农田钾平衡的计算，即以农田为研究对象，对涉及农田的所有钾素输入量与输出量分别进行测算，然后差减所得到的值。正值代表农田钾素盈余，负值代表农田钾素亏缺，即：钾平衡=钾输入–钾输出。

钾输入量主要包括化肥和有机肥，此外还有大气干湿沉降、灌溉水以及作物种子等来源。李书田等[8]总结了全国各地资料，提出通过干湿沉降输入到农田的钾素(K_2O，下同)平均每年 8.3 $kg\cdot hm^{-2}$，通过灌溉水带入农田的养分平均每年 14.8 $kg\cdot hm^{-2}$，种子带入的数据因作物而异，也比较容易查到。

钾输出量包括作物吸收的钾量(包括籽粒和秸秆)和钾损失量两部分。作物吸收量可以根据作物经济产量和生产单位经济产量所需的钾数量进行估算。作物吸收的钾量因作物而异，比较容易查到参考值，也可通过田间试验得到更为精准的适合当地的数值。钾的损失以水田淋失为主，一般南方水田约 12 $kg\cdot hm^{-2}$[9]，北方水田约 6 $kg\cdot hm^{-2}$[10]。旱地土壤一般没有淋失，而且钾离子易于被土壤吸附或固定而减少损失，且固定的钾对后茬仍有效，因此旱地土壤钾素的损失可不计[8]。

2　我国农田钾平衡状况

许多学者从不同的尺度和角度对我国土壤钾平衡状况进行了研究。从研究尺度看，有国家尺度、省级尺度的研究，也有流域尺度和县级尺度的研究；从研究角度和内容来看，计算钾盈亏比例、单位耕地面积钾盈亏强度，以比较不同区域之间农田钾平衡的差异是比较常见的，也有一些对作物钾平衡状况的专项调查，比较不同作物之间或同一种作物不同区域间钾平衡的差异。下面从钾素平衡量(盈亏量)、不同区域间的差异、时间变化特征、不同作物的农田钾平衡状况、钾平衡对土壤钾养分库的影响(土壤钾库的变化趋势)等几方面进行综述。

2.1　我国农田钾平衡的时空变异特征

2.1.1　我国农田钾平衡的空间变异特征

2.1.1.1　钾素平衡量(盈亏量)

对全国钾素平衡状况(是盈余还是亏缺)的总体判断：无论基于监测数据还是统计数据分析，大部分研究结果是，我国整体钾平衡状况为亏缺[7,11-13]。也有研究者认为，全国钾素输入与输出基本持平[8]。

关于盈亏绝对量的计算结果，由于不同研究者的具体研究年份、研究方法、所取参数的不同导致

平衡量计算结果的差异非常大，引用和比较时要注意分析，而不可仅仅直接引用结果。表 1 汇总了近年来我国相关研究者对全国及区域性农田钾素平衡核算结果。从表中可以看出，全国钾平衡总量和单位面积钾平衡量，即使对于同一个研究对象(如 2000 年以后，全国)，不同研究者所得结果差别亦很大，甚至有数量级的差异，如钾平衡总量从 -3.9×10^6 t[14]到 4.3×10^5 t[8]，单位面积钾平衡量从 −74 $kg\cdot hm^{-2}$[12]到 15.53 $kg\cdot hm^{-2}$[15]。

2.1.1.2 区域平衡

对不同区域间的钾养分平衡状况进行比较也是基本的研究内容之一。从表 1 还可以看出，不同研究者对全国不同区域间钾素亏缺与盈余程度的研究结果也有差异。国家级耕地土壤监测结果表明 2006 年全国 6 大区域土壤钾素都有不同程度的亏缺，西北地区亏缺最严重[12]。李书田等[8]认为亏缺区域在东北、华北、长江中下游地区；方玉东等[14]则认为集中于中西部地区、东部、南疆及黑龙江的某些县域。李书田等[8]认为西北地区收支平衡，只有东南和西南地区钾素盈余。鲁如坤等[7]研究了南方 6 省中有 3 个省(福建、广东、广西)盈余，其余 3 个省(浙江、江西、湖南)有所亏缺。程琳琳[16]认为，钾平衡过高的县市集中在西部地区，如西藏、新疆、内蒙等省份，而农业集约化程度高的东南部地区，如河南、湖北、江苏、安徽等省钾平衡大多为负值。

造成这一结果的原因，除了上节所述的研究时间、研究方法、参数等不同外，不同研究者的具体分区也不尽相同。同样是对全国的分区，有的分为 6 个区，有的分为 7 个区。而同样是 6 大分区，不同研究者具体的分法也可能不同。李书田等[8]分为 6 大区：东北、华北、长江中下游、西北、西南、东南；全国农技中心的分区为：华北、东北、华东、华南、西北、西南[12]；程琳琳[16]则分为 7 个区：华北、东北、华东、中南、西北、西南、华南。分区的不同，必然也会导致相应的结果不同。

2.1.2 我国土壤钾平衡的时间变化特征

尽管对钾平衡量不同学者的研究结果不尽相同，但对土壤钾素平衡状况的变化趋势却基本一致：建国以来，全国整体呈现先下降后上升趋势，但不同区域间表现不一。该结果也是我国不同历史时期农田钾素投入、带出量的综合体现。如前所述，由于不同研究者所取的参数、体系、研究时间段不同，不宜进行直接对比。表 2 列举了部分研究者对这一变化趋势的分析结果。

程琳琳[16]测算结果表明：从 1951 年到 2004 年我国钾平衡一直处于亏缺状态，整体上呈现先下降后上升的趋势。不同区域表现则不同，以 1995 年到 2004 年为例，华北五省、华南三省钾平衡呈现不断上升的趋势；华东地区一直维持一个较稳定的状态；西北、西南等地则前 3 年先下降，之后略微上升。

鲁如坤等[7]总结了新中国建国以后 40 年(1949—1991 年)的钾养分平衡，结果表明亏缺率一直在 40%左右。他后来研究南方 6 省 10 年间(1986—1995 年)农田钾素平衡情况，发现除 3 个省盈余外，另外 3 个亏缺的省份 10 年来亏缺程度均有所减缓，从而提出了在钾盈余区，应强调节约用钾[20]。

20 多年(1985—2006 年)的全国土壤监测结果则显示，前 10 年钾素亏缺量有逐年减少的趋势，后 10 年钾素亏缺量则略有增加。从不同区域的历史分析看，钾素表观盈亏量华北区钾素亏缺有逐年增加的趋势，东北区基本稳定，华东、华南、西北、西南钾素亏缺量有逐年减少趋势[12]。

2.2 我国不同作物的农田钾平衡状况

不同作物之间钾平衡会受到两个方面影响：一是作物本身的营养吸收特性不同(如蔬菜、果树、烟草作物需钾量较大)，二是钾肥投入量会受到肥料和农产品市场价格波动影响，这两个因素共同决定了不同作物类型之间及同种作物不同年际间钾平衡的差异。还有研究认为，钾平衡与经济、社会、教育程度等指标有关[21]。

我国几种典型轮作制度下，土壤钾素平衡状况为：小麦(*Triticum asetivum*)-玉米(*Zea mays*)轮作土壤钾素表观亏缺 107.8 $kg\cdot hm^{-2}$，盈亏率−44.7%；早稻(*Oryza sativa*)-晚稻轮作土壤钾素表观亏缺 66.6 $kg\cdot hm^{-2}$，盈亏率−46.3%；油菜(*Brassica campestris*)-水稻/玉米/棉花(*Gossypium* sp.)轮作土壤钾素表观亏缺 52.5 $kg\cdot hm^{-2}$，亏缺率−33.7%[12]。灰漠土小麦-玉米-棉花轮作体系钾亏缺正在逐步加大[22]。湖北省 6 种种植制度(油菜-棉花、休闲-棉花、油菜-水稻、小麦-水稻、早稻-晚稻和单季稻)年平均亏缺量为 52.4 $kg\cdot hm^{-2}$[23]。水旱轮作体系[水稻-大麦(*Hordeum vulgare*)]中，在年施钾量(K_2O)187.5 $kg\cdot hm^{-2}$ 条件下，土壤钾素仍表现亏缺[24]。

不同区域的冬小麦-夏玉米研究结果表明，如果不施钾肥、不采用秸秆还田措施，华北地区的钾素年表观亏缺量为 134~258 $kg\cdot hm^{-2}$，西北地区为 220~261 $kg\cdot hm^{-2}$[13]。笔者于 2015 年对华北平原 5

表 1　相关研究者对全国及区域性农田钾素平衡核算结果

Table 1　Main results of national and regional K balance calculation in China

研究区域 Research area	钾平衡总量 Total K balance (t)	单位面积平衡量 K balance per unit area (kg·hm^{-2})	盈亏率 Balance ratio (%)	亏缺区域 Deficient area	盈余区域 Surplus area	研究方法 Research method	研究时段 Research period	发表时间 Published time	文献 Literature
全国 Nationwide	4.3×10^{5}	2.5		东北、华北、长江中下游地区 Northeast and North China, the middle and lower reaches of Yangtze River	东南、西南 Southeast and Southwest China	统计数据 Statistical data	2009	2011	[8]
全国 Nationwide	−3.9×10^{6}	−40		集中于中西部, 东部、南疆及黑龙江某些县域 Middle and West China and some counties in East China, south Xinjiang and Heilongjiang	西藏、四川西北部、广西、福建、海南 Tibet, northwest Sichuan, Guangxi, Fujian, Hainan	统计数据 Statistical data	2000	2009	[16]
全国 Nationwide		−74.1	−37.4	西北、华东 Northwest and East China		国家级耕地土壤监测 National arable land soil monitoring	2006	2008	[12]
全国 Nationwide	−2.9×10^{6}			华东、华北 East and North China	西藏、青海、福建、广东、广西、海南、甘肃、贵州 Tibet, Qinghai, Fujian, Guangdong, Guangxi, Hainan, Gansu, Guizhou	统计数据 Statistical data	2004	2007	[16]
全国 Nationwide		15.53	−15.09	东北、江苏、上海 Northeast China, Jiangsu, Shanghai	海南、广东、北京、福建、广西、宁夏、贵州 Hainan, Guangdong, Beijing, Fujian, Guangxi, Ningxia, Guizhou	统计数据 Statistical data	2005	2008	[15]
南方 6 省 1) 6 provinces in South China1)			−48(浙)~93(粤)	浙江、江西、湖南 Zhejiang, Jiangxi, Hunan	福建、广东、广西 Fujian, Guangdong, Guangxi	统计数据 Statistical data	1995	2000	[7]
6 个试验站所在县域 2) 6 stations affiliating counties2)		−76.4(常熟 Changshu)~10.3(鹰潭 Yingtan)		常熟、沈阳、海伦 Changshu, Shenyang, Hailun	鹰潭、栾城 Yingtan, Luancheng	统计数据 Statistical data	1999	2008	[17]
北方 13 省 3) 13 provinces in North China3)		−134~−258(华北, 小麦-玉米 North China, wheat-maize rotation); −220~−261(西北, 小麦-玉米 Northwest China, wheat-maize rotation)				25 个田间定位试验 25 field trials	1993—1998	1999	[13]
北京 Beijing		−41(褐潮土 Aquic cinnamon soils)				基地网 4) National soil fertility monitoring network4)	1991—2004	2012	[18]
重庆 Chongqing		−68(紫色土 Purplish soils)				基地网 4) National soil fertility monitoring network4)	1991—2004	2012	[18]
河北 Hebei	−3.13×10^{4}		−3.2			统计数据 Statistical data	2010	2014	[19]

1)南方 6 省分别为 浙江、福建、江西、湖南、广东、广西; 2)我国 6 个农业生态试验站分别为海伦、沈阳、栾城、长武、常熟、鹰潭; 3)北方 13 个省分别为山东、河南、河北、天津、辽宁、吉林、黑龙江、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆; 4)全称为"国家土壤肥力与肥料效益长期监测基地网"。1) The 6 provinces in South China are Zhejiang, Fujian, Jiangxi, Hunan, Guangdong and Guangxi. 2) The 6 stations are Hailun, Shenyang, Luancheng, Changwu, Changshu and Yingtan; 3) The 13 provinces in North China are Shandong, Henan, Hebei, Tianjin, Liaoning, Jilin, Heilongjiang, Shanxi, Shaanxi, Ningxia, Gansu, Qinghai and Xinjiang. 4) The full name is "National Long-term Monitoring Network of Soil Fertility and Fertilizer Efficiency".

表 2 农田钾素平衡随时间变化的相关研究结果

Table 2 Main results of temporal changes of China's national and regional K balance

研究时段 Research period	盈亏率 Balance ratio (%)	钾平衡量 K balance (10^4t)	数据来源 Data resource	研究区域 Research area	出处 Literature
1951		−187.6	统计数据+文献参数 Statistical data and literature	全国 Nationwide	[16]
1979		−373.3			
1980		−352.4			
1983		−440.0			
1985		−410.1			
1986		−428.1			
1987		−460.7			
1990		−482.4			
1991		−446.1			
1992		−412.4			
1993		−434.1			
1994		−365.9			
1995		−385.9			
1996		−396.7			
1997		−433.3			
1998		−421.8			
1999		−376.8			
2000		−303.7			
2001		−298.0			
2002		−282.4			
2003		−216.3			
2004		−292.0			
1949	−38.9		全国化肥区划 National fertilizer regional planning	全国 Nationwide	[20]
1957	−49.1				
1965	−45.3				
1975	−41.6				
1983	−46.4				
1991	−40		统计数据 Statistical data		
1986—1995	−0.4		统计数据+试验数据 Statistical and field trial data	浙江 Zhejiang	[7]
	+18			福建 Fujian	
	−3.3			江西 Jiangxi	
	−10.6			湖南 Hunan	
	+12.0			广东 Guangdong	
	+5.6			广西 Guangxi	
1985		≈−300	统计数据+文献参数 Statistical data and literature	全国 Nationwide	[15]
1990		≈−450			
1995		≈−350			
2000		≈−200			
2005		≈−250			
1993—2001	钾素一直处于亏缺状态，但是亏缺量 1994—1998 年间较为稳定，之后亏缺水平下降。Overall was in deficit state, but the deficit amount was stable from 1994 to 1998, and then decreased.		统计数据+文献参数 Statistical data and literature	全国 Nationwide	[21]

≈表示该数值根据原文图估算得到。“≈” stands for the data are estimated according to the chart in literature.

种轮作类型的钾平衡状况进行调查, 3 种轮作类型为亏缺[冬小麦-夏玉米、冬小麦-花生(*Arachis hypogaea*)、冬小麦-大豆(*Glycine max*)], 2 种盈余[小麦-棉花、大蒜(*Allium sativum*)-棉花], 其中冬小麦-夏玉米、冬小麦-花生轮作亏缺均超过 200 kg·hm^{-2}(课题组未发表资料, 2016)。通常情况下经济作物施钾量是粮食作物的 1.4~2.6 倍, 全国 50 000 多个土壤样品土壤速效钾含量的分析结果也表明, 1990—2012 年间经济作物土壤钾含量的增速高于粮食作物土壤[25]。山东保护地蔬菜钾盈余 3 437 kg·hm^{-2}[26]。

由于烤烟(*Nicotiana* sp.)生长养分需求的特殊性, 我国烤烟生产所用钾肥占全国总钾肥的比例明显高于氮、磷等肥料。同我国钾平衡出现明显亏缺相比, 我国烤烟烟区的土壤钾素出现明显盈余。钾素过量虽不像氮磷那样对环境产生威胁, 但造成资源浪费, 直接影响经济效益和农民收入。据研究, 全国烤烟钾素平均输出/投入比值为 27.7%, 但不同植烟区钾平衡状况存在明显差别, 北方烟区的钾素输出/投入比值高于南方烟区[27-28]。

2.3　钾平衡对土壤钾养分库的影响

2.3.1　施用钾肥对土壤钾库的影响

区域农田养分盈亏是驱动农田土壤肥力时空变化的主要因素。对我国 6 个农业生态试验站(海伦、沈阳、栾城、长武、常熟、鹰潭)农田土壤肥力在近年来时空演变的研究表明, 农田钾素的盈亏量与土壤速效钾的年变化量显著相关, 农田钾的盈亏量决定了土壤钾养分的变化方向[17]; 也有研究表明不同作物及不同轮作模式农田钾养分盈余量与收获时土壤表层(0~30 cm)的速效钾含量呈正相关, 但未达显著水平[29]。长期的钾平衡负值导致土壤交换性钾的消耗[30]。不同含钾物料(稻草、稻草灰、硅钙钾肥、枸溶性钾肥和氯化钾肥)可以显著提高土壤各形态钾素含量[31]。

徐明岗等[32]总结了长期施肥典型农田土壤速效钾的演变规律: 长期不施钾肥, 土壤速效钾含量下降, 尤其是在南方地区; 施用一定量钾肥, 土壤速效钾可维持原有水平; 化肥与有机肥配合, 土壤速效钾则明显增加。

在山西石灰性褐土一年 1 作条件下, 通过 16 年的田间定位试验, 只施用氮、磷肥情况下, 土壤钾素年平均亏缺 104.3 kg·hm^{-2}, 与试验前的初始值比较, 土壤速效钾和缓效钾含量分别下降 23.6%和 14.3%。在施用氮、磷肥的基础上每年施用钾肥+小麦秸秆还田则土壤速效钾、缓效钾分别提高 38.6%和 11.0%[33]。

而塿土区小麦-玉米轮作体系结果则表明, 长期施用钾肥显著提高土壤速效钾含量, 但长期不施钾肥处理的土壤速效钾含量也未显著降低; 无论施钾与否土壤非交换性钾以及非交换性钾中更容易被 HNO_3溶解提取的钾均明显低于试验前水平[34]。

红壤稻田系统 14 年田间定位试验结果表明: 不施肥或仅施化肥, 土壤钾素严重亏缺, 其中以不施 K 的 NP 处理最严重, 平均每年亏损 120.1 kg·hm^{-2}, 有机物养分循环利用的施肥制度可大幅降低稻田土壤钾素亏损甚至出现钾素盈余[35]。

2.3.2　土壤钾库的变化趋势

长期定位试验和全国土壤普查结果表明, 自新中国成立以来, 除部分地区农田土壤有效钾含量有所增加外, 全国土壤钾变化的总体趋势是: 随着产量水平不断提高及有机肥施用量的相对减少, 土壤钾的收支平衡入不敷出, 呈逐年耗竭趋势, 缺钾面积持续扩大[36]。

2.3.2.1　土壤速效钾含量变化趋势

土壤速效钾是短期内能被作物利用的钾素, 因而研究我国土壤速效钾含量的变化状况, 对合理利用钾肥资源, 提高施钾效果有重要意义。

从国家级耕地土壤长期定位监测点 1985—2006 年 20 年的监测结果看, 全国耕层速效钾含量变化趋势表现为稳中有升, 从 1985 年的 76 mg·kg^{-1} 上升到 127 mg·kg^{-1}, 年均增加 2 mg·kg^{-1}[37]。不同时间段、不同区域速效钾含量结果看, 1987—1997 年华北、华东、华南区有显著上升趋势, 东北、西北、西南区有下降趋势; 1998—2006 年, 东北、华北、华东、华南区有上升趋势, 西北、西南区变化基本平稳。我国土壤速效钾含量分布大体呈南低北高趋势。

He 等[25]分析了全国 58 559 个土壤样本中速效钾含量, 其值由 1990s 的 79.8 mg·L^{-1} 增加到 2000s 的 93.4 mg·L^{-1}。过去 20 年东北地区的土壤速效钾含量未出现显著变化, 但华北、东南和西南地区分别增加 34.8%、17.9%和 30.2%, 而西北地区则下降 75.9%。

还有许多区域性的土壤钾库研究, 如黑土区土壤速效钾含量都出现不同程度的降低, 平均降低 40 mg·kg^{-1}, 约占总量的 20%; 潮土区土壤速效钾的变化空间差异很大, 有的区域增加(北京通州、山东陵县), 有的区域减少(河北曲周), 这与人们的施肥管理有关[38]。华北平原的数据资料丰富, 研究也比较多, 如在河北省冬小麦-夏玉米轮作区的研究表明, 与第二次土壤普查时相比, 土壤速效钾含量

明显上升[39-40]，进一步研究表明除衡水、廊坊升高外，其他地区(保定、沧州、邯郸、石家庄、邢台)基本保持不变[41]；河北曲周县 1980—2010 年 30 年来土壤速效钾含量随时间的推移呈递减的趋势，前 20 年下降很快，后 10 年表现为总体略有下降，但局部有上升的趋势[42]。江苏淮安县 1982 至 2013 年，土壤速效钾变化趋势为上升—下降—平稳—略降[43]。陕西榆林地区近 30 年来土壤速效钾养分均有所提升[44]。

2.3.2.2 土壤缓效钾含量变化趋势

缓效钾作为评价土壤供钾潜力的指标，其不断释放可以使速效钾维持在适当的水平。当评价土壤的长期供钾潜力时，应主要考虑土壤缓效钾的含量。国家级耕地土壤监测结果表明，耕层缓效钾平均含量为 661 $mg\cdot kg^{-1}$，从不同区域看，全国耕层土壤缓效钾含量，西北最高，东北、华北次之，但都普遍高于全国平均水平，华南、华东、西南地区缓效钾含量最低，普遍低于全国平均水平[12]。

3 改善我国农田钾平衡状况的对策与思考

钾素是植物必须的大量营养元素，也是宝贵的不可再生的资源，需要合理利用；土壤中钾养分含量，是研究土壤养分供应能力的基础。同时，土壤养分含量的高低，又取决于农田多年养分平衡状况的累积，尤其对于钾这样没有挥发损失、当季利用率不高的元素。理论上，如某元素持续盈余，则土壤中该元素的含量会升高；反之如某元素持续亏缺，则土壤中该元素的含量会降低。当然，由于土壤钾养分库的巨大库容，加之缓效钾-速效钾的补充体系，导致农田钾素养分平衡对土壤速效钾的反应短期内有可能不会明显表现出来，但是，农田钾素平衡的测算，仍然不失为一项掌握土壤钾养分库动态，预测其将来的发展方向，预判土壤对作物生长的供给状况、土壤肥力走向的方便快捷的重要指标。

从养分平衡公式可以看出，要改善农田钾平衡状况，根本上来说还是要从输入(钾源的投入)和输出(产量带走量、养分流失等损失)两个方面来协调。在掌握周年轮作作物钾素吸收特征、土壤钾库供应特征的情况下，各地做到因地、因时、因作物合理施用钾肥。

3.1 氮钾平衡，养分均衡

研究表明，当前 3 种大量元素氮磷钾的增产效益与 20 世纪 80 年代相比已经发生了明显变化，氮的增产效果明显降低，磷和钾的增产效果有所提高，尤其是钾肥的增产效果。与氮磷相比，目前钾肥在我国主要作物上的经济产投比最高[15]。无论是不同投入养分之间的比例，还是作物吸收与投入的比例，均应提高钾素在其中的占比。

由于当前农田施肥品种以复合肥为主，可以从调整区域大配方入手，针对不同区域的钾素平衡状况，适当调整不同区域钾的比例；辅以作物配方肥，以协调不同作物间的钾素营养平衡问题。

3.2 开源节流，多措并举

由于我国化肥钾资源的严重缺乏，钾的来源仍然要靠有机肥钾。我国有机肥资源量巨大，据测算，通过各种途径输入到全国农田的钾总量为 2 297 万 t，其中通过化肥输入的钾仅占总输入的 37.6%，通过有机肥输入的钾占总输入的 53.8%，其中通过人畜粪尿输入的钾占总输入的 34.9%，通过作物秸秆还田输入的钾占总输入的 17.5%[8]。与化学钾肥的高含钾量不同，有机肥钾含量较低，且不同有机肥品种的钾含量、释放特征差别十分明显，施用前应仔细了解当地主要有机肥钾源含量特征。建议开展我国不同区域气候条件下不同有机肥品种钾循环率试验，为合理施用有机肥，提高土壤钾库提供技术支撑。

国内外许多试验均已证实，为保持土壤钾素平衡，减轻作物对土壤钾素的消耗，缓解土壤钾素肥力下降的程度，维持土壤钾素肥力的稳定，钾肥施用的最佳处理组合是有机无机配施[34,45-48]，鉴于目前我国有机肥的农田施用比例在不断下降，十分有必要加强该方面的宣传。

秸秆还田是提高土壤肥力的基本措施，也是一种很好的补钾措施[49-51]。绝大多数试验研究表明：秸秆还田后土壤中的速效钾显著增加。我国是一个钾肥资源甚缺的国家，与氮磷等含量集中在籽粒不同，作物秸秆根茬中含钾量约占整株的 70%~80%，通过各种方式的秸秆还田对补充我国钾资源具有十分重要的意义，应引起高度重视[52]。

开源的同时还要注意节流，通过平衡施肥、提高植被覆盖度等措施，尽力减少土壤钾素流失。研究表明，过量施钾显著提高交换性钾的淋失[53]，特别是砂性土更易流失[54]；钾素流失量随雨强增大而增加，平衡施肥由于能提高植株覆盖度从而减少土壤侵蚀量和养分径流损失，提高养分利用率[55]。

3.3 加强不同作物轮作措施对钾素平衡的影响，以及钾肥施用的周年运筹研究

土壤养分库的变化，本质上是一个区域的种植制度、施肥方式经过多年的累积造成的；而不同作

物的养分吸收特性不同，可以利用其对土壤钾库进行调整。比如可以在长期钾库亏缺的地方除了施用钾肥等补充钾素的施肥措施外，通过种植钾吸收量相对较低的作物或配置适宜的作物轮作形式来达到土壤钾库的恢复。

轮作是一个区域内人们的一种长期行为习惯，是适应当地气候、土壤、栽培条件、人类行为的栽培方式，在一定时间范围内保持相对稳定，不同轮作直接决定了养分的投入量与带出量的不同，即养分平衡状况不同。轮作周期是决定土壤养分库发展的基本单元。养分平衡测算通常情况下针对的是 1 个茬次作物，今后需更多关注周年情况下多个作物组合(即作物轮作组合)的周年养分平衡及其对土壤养分库的影响。此外，钾肥的周年统筹技术层面，根据土壤钾库的释放特性和作物吸收钾素的规律，钾肥重点施于夏播作物上，但在实践层面，各地不同茬次具体分配多少钾肥比例，尚需更多的田间试验数据支撑。

3.4　关注更深层次的分层土壤性质，而非仅表层影响

目前对土壤钾库的研究大多是土壤表层 0~20 cm 左右，这是基于大部分地区土壤钾库尚未到达紧迫程度时方法。已有研究表明，目前我国部分地区土壤速效钾有显著的表聚现象和层化效应，且 15~30 cm 土层亏缺严重，已低于缺钾临界值[56]。笔者 2015 年对华北平原主要轮作土壤速效钾的调查结果也表明，小麦-玉米、小麦-花生轮作 10 cm 以下土层、小麦-玉米、小麦-花生、小麦-棉花 20 cm 以下土层速效钾均低于 100 $mg\cdot kg^{-1}$(课题组未发表资料，2016)。因而，从长远的角度看，随着钾库的亏缺，有必要进行更深层次和分层钾库的动态监测，及其不同深度土壤钾库与植物根系的关系研究，以实现土壤钾供给与植物钾吸收的匹配。

参考文献　References

[1] 刘枫，吴传洲，朱克保，等. 沿江平原稻麦轮作系统维持钾素平衡和作物高产的钾肥运筹研究[J]. 土壤，2014，46(2): 232–238
Liu F, Wu C Z, Zhu K B, et al. Study on potassium strategy to maintain crop high yield and potassium balance in cropland under rice-wheat rotation systems[J]. Soils, 2014, 46(2): 232–238

[2] 龙光强，孙波. 基于钾平衡和氮淋失风险的红壤猪粪安全用量[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 300–305
Long G Q, Sun B. Safety amount of pig manure application based on potassium balance and nitrate leaching risk on red soil[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 300–305

[3] 李书田，邢素丽，张炎，等. 钾肥用量和施用时期对棉花产量品质和棉田钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 111–121
Li S T, Xing S L, Zhang Y, et al. Application rate and time of potash for high cotton yield, quality and balance of soil potassium[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 111–121

[4] 郭翠英，王素萍，陈钢，等. 武汉市蔬菜地土壤养分状况与施肥现状研究[J]. 江西农业学报, 2016, 28(2): 22–26
Guo C Y, Wang S P, Chen G, et al. Study of soil nutrient and fertilizer application status in vegetable-growing soil in Wuhan City[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2016, 28(2): 22–26

[5] 李书田，崔荣宗，同延安，等. 钾肥用量和施用时期对苹果产量、品质和果园钾素平衡的影响[J]. 中国果树, 2016, (5): 11–18
Li S T, Cui R Z, Tong Y A, et al. Effect of potassium amount and application period on apple yield, quality and orchard K balance[J]. China Fruits, 2016, (5): 11–18

[6] 高义民，同延安，路永莉，等. 长期施用氮磷钾肥对黄土高原地区苹果产量及土壤养分累积与分布的影响[J]. 果树学报, 2012, 29(3): 322–327
Gao Y M, Tong Y A, Lu Y L, et al. Effect of long-term application of nitrogen, phosphorus and potassium on apple yield and soil nutrient accumulation and distribution in orchard soil of Loess Plateau[J]. Journal of Fruit Science, 2012, 29(3): 322–327

[7] 鲁如坤，时正元，施建平. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 63–67
Lu R K, Shi Z Y, Shi J P. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in southern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(2): 63–67

[8] 李书田，金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207–4229
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207–4229

[9] 颜廷梅，杨林章. 苏南水网地区农田钾素资源概况及潜力[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(1): 46–50
Yan T M, Yang L Z. Status and potentiality of field potassium resources in hydrographic net region in south of Jiangsu Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2000, 9(1): 46–50

[10] 姜子绍，宇万太. 农田生态系统中钾循环研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 545–550
Jiang Z S, Yu W T. Research advance in potassium cycling in agroecosystems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(3): 545–550

[11] Tan D S, Jin J Y, Jiang L H, et al. Potassium assessment of grain producing soils in North China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 148: 65–71

[12] 全国农业技术推广服务中心，中国农科院农业资源与区划所. 耕地质量演变趋势研究——国家级耕地土壤监测数据整编[M]. 北京：中国农业科学技术出版社, 2008
The National Agro-Tech Extension and Service Center (NATESC), Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Re-

search of the Evolution of Arable Land Quality — Summary of National Arable Land Soil Monitoring[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008

[13] 刘荣乐, 金继运, 吴荣贵, 等. 我国北方土壤-作物系统内钾素平衡及钾肥肥效研究Ⅰ. 主要种植制下的土壤钾素平衡与调控[J]. 土壤肥料, 1999, (6): 3–6
Liu R L, Jin J Y, Wu R G, et al. Studies on soils potassium balance and crop response to potash application in northern China. I. Soil potassium balance under main cropping systems[J]. Soils and Fertilizers, 1999, (6): 3–6

[14] 方玉东, 胡业翠, 封志明, 等. 基于GIS技术的中国农田钾素养分收支平衡研究[J]. 土壤, 2009, 41(2): 185–191
Fang Y D, Hu Y C, Feng Z M, et al. Balance of farmland Potassium nutrient input/output in China based on GIS[J]. Soils, 2009, 41(2): 185–191

[15] 刘晓燕. 我国农田土壤肥力和养分平衡状况研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008
Liu X Y. Study on soil fertility and nutrient balance of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008

[16] 程琳琳. 中国农田生态系统钾素平衡与钾肥需求[D]. 北京: 中国农业大学, 2007
Cheng L L. Potassium balance and potash fertilizer demand of farmland ecosystem in China[D]. Beijing: China Agriculture University, 2007

[17] 孙波, 潘贤章, 王德建, 等. 我国不同区域农田养分平衡对土壤肥力时空演变的影响[J]. 地球科学进展, 2008, 23(11): 1201–1208
Sun B, Pan X Z, Wang D J, et al. Effect of nutrient balance on spatial and temporal change of soil fertility in different agriculture area in China[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(11): 1201–1208

[18] 赵秉强. 施肥制度与土壤可持续利用[M]. 北京: 科学出版社, 2012
Zhao B Q. Fertilization Systems and Land Use Sustainability[M]. Beijing: Science Press, 2012

[19] 刘朝阳, 段英华, 杨莉, 等. 河北省农田土壤养分平衡现状研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(9): 170–174
Liu C Y, Duan Y H, Yang L, et al. Present situation of soil nutrient balance in Hebei Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(9): 170–174

[20] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究Ⅲ. 全国和典型地区养分循环和平衡现状[J]. 土壤通报, 1996, 27(5): 193–196
Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Research on nutrient cycling and balance of agricultural ecosystem in typical area. Ⅲ. The status quo of nutrient cycling and balance in national and typical area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(5): 193–196

[21] 杨林章, 孙波. 中国农田生态系统养分循环与平衡及其管理[M]. 北京: 科学出版社, 2008
Yang L Z, Sun B. Nutrient Cycling, Balance and Management of China's Farmland Ecosystem[M]. Beijing: Science Press, 2008

[22] 王西和, 吕金岭, 刘骅. 灰漠土小麦-玉米-棉花轮作体系钾平衡与钾肥利用率[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 213–223
Wang X H, Lü J L, Liu H. Potassium balance and use efficiency in grey desert soil under continuous wheat-maize-cotton crop rotation system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 213–223

[23] 夏颖, 刘冬碧, 张富林, 等. 湖北省主要种植制度农田生态系统钾平衡状况[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2395–2401
Xia Y, Liu D B, Zhang F L, et al. Potassium balance in the agroecosystem of the main cropping systems in Hubei Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(9): 2395–2401

[24] 唐旭, 计小江, 李超英, 等. 水稻-大麦长期轮作体系钾肥效率及土壤钾素平衡[J]. 中国农业科学, 2014, 47(1): 90–99
Tang X, Ji X J, Li C Y, et al. Study on potassium use efficiency and apparent soil potassium balance under long-term rice-barley rotation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(1): 90–99

[25] He P, Yang L P, Xu X P, et al. Temporal and spatial variation of soil available potassium in China (1990–2012)[J]. Field Crops Research, 2015, 173: 49–56

[26] Yu H Y, Li T X, Zhang X Z. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system[J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(6): 871–879

[27] 陶芾, 滕婉, 李春俭, 等. 我国烤烟生产体系中的养分平衡[J]. 中国烟草科学, 2007, 28(3): 1–5
Tao F, Teng W, Li C J, et al. Nutrient input and output balance in flue-cured tobacco production in China[J]. Chinese Tobacco Science, 2007, 28(3): 1–5

[28] 闫慧峰, 石屹, 李乃会, 等. 烟草钾素营养研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(1): 123–129
Yan H F, Shi Y, Li N H, et al. Progress in tobacco potassium nutrition[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(1): 123–129

[29] 许仙菊, 赵坚, 张维理, 等. 不同轮作模式农田钾养分表观平衡及其对土壤速效钾含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (3): 37–42
Xu X J, Zhao J, Zhang W L, et al. Potassium nutrient balance and its impact on soil available K content in Shanghai suburb farmlands[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016, (3): 37–42

[30] Subba R A, Srinivasarao C, Srivastava S. Potassium status and crop response to potassium on the soils of agro-ecological regions of India[M]. 2nd rev. ed. Horgen: International Potash Institute, 2011: 185

[31] 胡敏, 任涛, 廖世鹏, 等. 不同含钾物料对土壤钾素含量动态变化影响[J]. 土壤, 2016, 48(1): 48–52
Hu M, Ren T, Liao S P, et al. Effects of K-bearing materials on dynamic changes of soil K contents[J]. Soils, 2016, 48(1): 48–52

[32] 徐明岗, 梁国庆, 张夫道. 中国土壤肥力演变[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006
Xu M G, Liang G Q, Zhang F D. Soil Fertility Evolution in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006

[33] 王宏庭, 金继运, 王斌, 等. 山西褐土长期施钾和秸秆还田对冬小麦产量和钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报,

2010, 16(4): 801–808
Wang H T, Jin J Y, Wang B, et al. Effects of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 801–808

[34] 葛玮健, 常艳丽, 刘俊梅, 等. 塿土区长期施肥对小麦-玉米轮作体系钾素平衡与钾库容量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 629–636
Ge W J, Chang Y L, Liu J M, et al. Potassium balance and pool as influenced by long-term fertilization under continuous winter wheat-summer maize cropping system in a manural loess soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 629–636

[35] 文菀玉, 王凯荣, 谢小立. 红壤稻田不同施肥制度对土壤钾平衡和水稻产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 41–44
Wen W Y, Wang K R, Xie X L. Effect of different modes of fertilizer application on soil potassium balance and rice yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(3): 41–44

[36] 王兴仁, 张福锁, 张卫峰. 中国农化服务——肥料与施肥手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013
Wang X R, Zhang F S, Zhang W F. China Agro-Chemical Service: Fertilizer Manual[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013

[37] 陈印军, 王晋臣, 肖碧林, 等. 我国耕地质量变化态势分析[J]. 中国农业资源与区划, 2011, 32(2): 1–5
Chen Y J, Wang J C, Xiao B L, et al. Trends in the change of cultivated land quality of China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2011, 32(2): 1–5

[38] 周健民. 浅谈我国土壤质量变化与可持续利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 459–467
Zhou J M. Evolution of soil quality and sustainable use of soil resources in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(4): 459–467

[39] 薛彦东, 辛景树, 任意, 等. 华北小麦玉米轮作区耕地地力等级划分及特征[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(6): 530–536
Xue Y D, Xin J S, Ren Y, et al. Characteristics and gradations of cultivated land fertility for winter wheat-summer maize rotation system in north China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(6): 530–536

[40] 张瑞芳, 王红, 张爱军, 等. 河北省中部平原土壤速效钾和缓效钾的分析与评价[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(8): 1816–1821
Zhang R F, Wang H, Zhang A J, et al. Analysis and evaluation of soil rapidly-available potassium and slowly-available potassium in the central plain of Hebei Province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(8): 1816–1821

[41] 董若征. 河北省冬小麦-夏玉米轮作区土壤养分变化与供肥能力[D]. 保定: 河北农业大学, 2012
Dong R Z. Soil nutrients change and supply capability in the rotation system of winter wheat and summer maize in Hebei Province[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei Province, 2012

[42] 张玲娥, 双文元, 云安萍, 等. 30 年间河北省曲周县土壤速效钾的时空变异特征及其影响因素[J]. 中国农业科学, 2014, 47(5): 923–933
Zhang L E, Shuang W Y, Yun A P, et al. Spatio-temporal variability and the influencing factors of soil available potassium in 30 years in Quzhou County, Hebei Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(5): 923–933

[43] 马玉军, 张杰, 倪言成, 等. 淮安市农田土壤速效钾变化规律及钾养分收支平衡分析的研究[J]. 农业开发与装备, 2014(9): 83–86
Ma Y J, Zhang J, Ni Y C, et al. Study on soil available potassium variations and potassium balance of Huai'an cropland[J]. Agricultural Development and Equipments, 2014(9): 83–86

[44] 杨才玉. 榆林地区土壤速效钾时空变异研究[D]. 西安: 长安大学, 2014
Yang C Y. Research of temporal and spatial variability of soil potassium in Yulin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014

[45] Srinivasarao C, Kundu S, Ramachandrappa B K, et al. Potassium release characteristics, potassium balance, and finger-millet (*Eleusine coracana* G.) yield sustainability in a 27-year long experiment on an Alfisol in the semi-arid tropical India[J]. Plant and Soil, 2014, 374(1): 315–330

[46] 王志勇, 白由路, 杨俐苹, 等. 低土壤肥力下施钾和秸秆还田对作物产量及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 900–906
Wang Z Y, Bai Y L, Yang L P, et al. Effects of application of potassium fertilizer and straw returning on crop yields and soil potassium balance in low-yielding fields[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 900–906

[47] 关焱, 宇万太, 李建东. 长期施肥对土壤养分库的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 131–137
Guan Y, Yu W T, Li J D. Effects of long-term fertilization on soil nutrient pool[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(6): 131–137

[48] 赵欢, 芶久兰, 赵伦学, 等. 贵州旱作耕地土壤钾素状况与钾肥效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 277–285
Zhao H, Gou J L, Zhao L X, et al. Analysis on status of soil potassium and the effects of potassium fertilizer in dryland soil in Guizhou[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 277–285

[49] 孙丽敏, 李春杰, 何萍, 等. 长期施钾和秸秆还田对河北潮土区作物产量和土壤钾素状况的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1096–1102
Sun L M, Li C J, He P, et al. Effects of long-term K application and straw returning on crop yield and soil K status in fluvo-aquic soil of Hebei Province[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(5): 1096–1102

[50] 李秀双, 师江澜, 王淑娟, 等. 长期秸秆还田对农田土壤钾素形态及空间分布的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(3): 109–117
Li X S, Shi J L, Wang S J, et al. Effect of long-term straw returning on form and spatial distribution of potassium in agricultural soil[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2016, 44(3): 109–117

[51] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产

量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1110–1118
Xie J G, Hou Y P, Yin C X, et al. Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(5): 1110–1118
[52] 刘巽浩. 农作学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2005
Liu X H. Science of Farming System[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2005
[53] Qiu S J, Xie J G, Zhao S C, et al. Long-term effects of Potassium fertilization on yield, efficiency, and soil fertility status in a rain-fed maize system in northeast China[J]. Field Crops Research, 2014, 163: 1–9
[54] Sharma V, Sharma K N. Influence of accompanying anions on potassium retention and leaching in potato growing alluvial soils[J]. Pedosphere, 2013, 23(4): 464–471
[55] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 等. 平衡施肥及雨强对紫色土养分流失的影响[M]//李华栋. 农业持续发展中的植物养分管理. 南昌: 江西人民出版社, 2008
Lin C W, Chen Y B, Huang J J, et al. Effect of balanced fertilization and rain intensity on nutrient loss from a purple soil in Sichuan[M]//Li H D. Plant Nutrition Management in Sustainable Agriculture. Nanchang: Jiangxi People's Publishing House, 2008
[56] 师江澜, 李秀双, 王淑娟, 等. 长期浅耕与秸秆还田对关中平原冬小麦-夏玉米轮作土壤钾素含量及层化比率的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3322–3328
Shi J L, Li X S, Wang S J, et al. Effect of long-term shallow tillage and straw returning on soil potassium content and stratification ratio in winter wheat/summer maize rotation system in Guanzhong Plain, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3322–3328